

合成孔径雷达光学处理器的检测方法

金 友

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文以一个通用合成孔径雷达光学处理器(简称 OSARP)的检测为例,来说明 OSARP 的检测方法。给出 OSARP 的每个可调部件与合成孔径雷达(简称 SAR)数据片的各特征参数间的关系,通过测量调整量求得 OSARP 的适用范围;用普通检测目标加位移透镜,来检测 OSARP 的成像质量。同时用模拟的 SAR 数据片,以另一种方法对 OSARP 做检测,结果相同。最后处理了真实 SAR 数据片,用来展示 SAR 和 OSARP 的综合成像质量。文中给出一些实验照片和数据,结果表明,本检测方法是可行的。

关键词: 合成孔径雷达光学处理器,合成孔径雷达数据片。

一、引 言

合成孔径雷达(SAR)和合成孔径雷达光学处理器(OSARP)成像,是两步完成的非常规成像^[1]。第一步, SAR 收集地面景物对雷达波射的数据,并以准全息图的形式记录在胶片上,即 SAR 数据片;第二步, OSARP 对 SAR 数据片进行处理得到图像,该图像表示微波波段的地面景物反射特性。

对于这样一个两步成像系统的后半部分的检测和对常规成像系统的检测方法不同。作者认为对这样系统都应做双向检测^[2,3]: (1) 往前方向,检测 OSARP 是否能处理现有 SAR 给出的各种数据片,即 OSARP 的适用范围(通用性); (2) 往后方向,检测 OSARP 处理的图像之质量。因为任何一个方向上的检测出现问题,系统都不能使用。但是,许多文献往往重视 OSARP 的成像质量检测,对其适用范围的检测重视不够,检测的项目也不完全。

本文以检测一个通用 OSARP(长春光机所研制)为例,说明 OSARP 的检测方法。求出 OSARP 的适用范围;最后,用 OSARP 处理真实 SAR 数据片,用以观测 SAR 和 OSARP 综合成像质量*。

二、OSARP 的适用范围

1. 数据片的特征参数

一个点目标数据片类似于费涅耳带板,当用平行相干光照明它时,会产生两条分立的焦线,如图 1 所示。通常数据片可用七个特征参数来表征: 偏置角 θ ; 斜距焦距 f_r ; 方位焦距 f_a ; 数据片孔径长度 $B_r \times B_a$; 斜距缩比 q ; 方位缩比 p 和纵横比 $k = (q/p)$ 。参数值可由雷

收稿日期: 1986年9月19日; 收到修改稿日期: 1986年11月17日

* 应该指出,文中所给实验照片和数据只是为了说明检测方法,被检测系统还在研制中,不是最终结果。

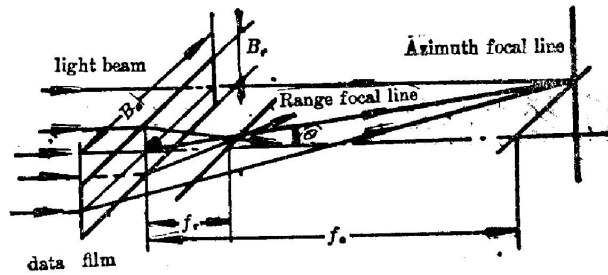


Fig. 1 SAR data film of a point scatterer

达参数和飞行情况计算出来^[4],也可以在 SAR 数据片上直接测量出来^[5].

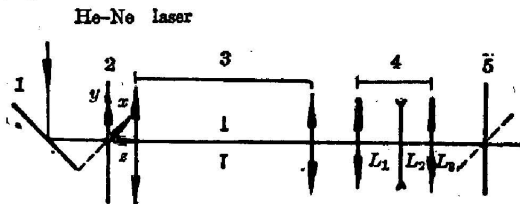


Fig. 2 OSARP figure

2. OSARP 的可调部件

OSARP 的通用性是通过它的各活动部件的调整量来体现的。一个通用 OSARP 可分六大部分^[6],除光源部分以外,其余部分如图 2 所示:(1) 偏置反射镜,可以绕 y 轴转动和绕 x 轴转动;

(2) 数据片输片机,可以沿光轴(z 轴)移动和绕轴转动;(3) 斜距望远镜系统,由两个焦距相同的球透镜($f=750$ mm)构成,固定不动;(4) 方位变倍望远镜系数,由三个柱透镜 $L_1(f_1=350$ mm)、 $L_2(f_2=-50$ mm)和 $L_3(f_3=100$ mm)构成,可以沿 z 轴相对移动,望远镜整体放在一个滑动导轨上,可以整体沿 z 轴移动;(5) 图像片输片机,可以绕 x 轴转动;(6) 数据片平面、图像片平面及斜距望远镜共焦面(频谱面)各放一个可变孔径的光阑。

3. 部件调整量与数据片参数间的关系

(1) 偏置反射镜转角与数据片的偏置角有关。在该系统中,数据片的方位偏置角 θ 等于偏置反射镜绕 y 轴的转角。

(2) 数据片输片机移动量它对应于数据片的斜距焦距 f_r 。图像片输片机是固定不动的,距离图像片 $4f$ 处数据片输片机的位置为 $f_r=0$,由此位置,数据片输片机往光源方向的移动量为正斜距焦距;反之,为负斜距焦距。

(3) 方位望远镜倍率应等于数据片纵横比 k 的倒数。其变化范围受三个柱透镜相对位置和方位望远镜总长度 L 的制约为

$$d_1 = -\frac{f_1 f_2}{k f_3}, \quad d_2 = -\frac{k f_2 f_3}{f_1}, \quad L = f_1 + d_1 + 2f_1 + d_2 + f_3. \quad (1)$$

式中 d_1 和 d_2 为柱透镜焦点之间距离。在方位望远镜各组件互不相碰和总长度不超过第二球透镜到图像片之间距离的条件下,可以测量和计算出方位望远镜的倍率范围。

(4) 方位望远镜整体移动量与 SAR 数据片方位焦距 f_a 连系,在保证方位望远镜前表面与第二球透镜以及后表面与图像片输片机不相碰的条件下,在方位望远镜整体移动量不超过方位望远镜支承导轨长度(811.2 mm)的条件下,给定一 k 值,测量方位望远镜整体移动量 z_1 ,可计算出方位焦距 f_a 的范围为

$$f_a = (k^2 - 1)z_1 - L - f_1 - f_3 + f_r + (k f_1 f_3 / f_2), \quad (2)$$

式中 z_1 为 L_3 后焦面到图像片的距离。

(5) 数据片的最小斜距缩比 q_{\min} 受输片机最大转角 α_{\max} 控制。斜距望远镜放大倍数为 1, 数据片和图像片的倾角相等, 设为 α , 则

$$\alpha = \frac{k^2 \beta}{k^2 - 1}, \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_r}{2q\lambda_L} \right), \quad (3)$$

式中 λ_r 为雷达波长 (32 mm), λ_L 为激光波长 (0.63×10^{-3} mm)。测量输片机最大转角可以求出最小斜距缩比。

(6) 设数据片光阑口径为 $O_r \times O_s$ 、图像片光阑口径和数据片孔径为 $B_r \times B_s$ 。由于光阑口径限制数据片的孔径和可获得的最大分辨率, 应满足公式为

$$O_s \geq I_s k + B_s, \quad O_r \geq I_r + B_r. \quad (4)$$

如果不满足这个关系, 则造成数据片孔径的切割, 像的分辨率降低。而谱面光阑口径 $T_r \times T_s$ 应满足公式为

$$T_s \geq \frac{B_s}{f_s} f = \frac{u_s}{\lambda_L} f \lambda_L, \quad T_r \geq \frac{B_r}{f_r} f = \frac{u_r}{\lambda_L} f \lambda_L, \quad (5)$$

其中, (u_s/λ_L) , (u_r/λ_L) 分别为方位和斜距物方分辨率。当分别测得三个光阑的最大口径, 根据上面的关系可以算出能处理的最大数据片孔径和可获得的最大分辨率。

(7) 适用范围测量结果及说明。根据 OSARP 各活动部件调整量与 SAR 数据片特征参数间的关系, 测量及计算结果如表 1 所示。系统可达到的倍率及数据片方位焦距范围如表 2 所示。三个光阑最大口径及所能处理的数据片最大孔径及可达到的分辨率为: 数据片光阑口径 $O_s \times O_r = 100 \times 78 \text{ mm}^2$, 图像片光阑口径 $I_s \times I_r = 4 \times 70 \text{ mm}^2$, 频谱面光阑口径 $T_s \times T_r = 20 \times 35 \text{ mm}^2$, 能处理数据片最大孔径 $B_s \times B_r = 98 \times 60 \text{ mm}^2$, 最高物方分辨率: $40(\text{lp/mm}) \times 70(\text{lp/mm})$ 。

Table 1

adjustment quantity of OSARP part	SAR parametric range
angle of telescope around y-axis $0^\circ \sim 5^\circ$	azimuthal angle θ $0^\circ \sim 5^\circ$
move of data film feeder $-20 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$	oblique focal distance $-20 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$
angles two feeder around x-axis α $\pm 22^\circ$	oblique contraction ratio $q \geq 6.5 \times 10^4$

Table 2

k	4		12		20		30	
d_1 mm	43.75		14.58		8.75		5.83	
d_2 mm	57.14		171.43		285.71		428.57	
L mm	450.89		536.01		644.46		784.40	
Z_1 mm	24.73	360.3	24.7	275.2	24.7	166.7	24.7	26.8
$f_s - f_r$ mm	0	1.7	0	30.0	0	51.4	0	18.6

上面测量得到的 OSARP 适用范围是系统可达到的范围, 并不是说在这个范围内系统的成像质量都好, 所以要进行下面的质量检测。一个系统的设计和制造误差, 在各调整状态

下对系统成象质量的影响是共同的。因此,我们根据设计指标对系统进行抽样检测。

三、OSARP 的成像质量

为了检测 OSARP 的成像质量,把各种间距的三条线鉴别率板和 16 条等间距线条的几何失真检测模板分段复制在 Kodak 3493 胶片上,作为检测目标称作试验胶片 I。因为 OSARP 是针对 SAR 数据片设计的,也就是说 OSARP 的检测目标应是二维分开的物体为此,在斜距望远镜频谱面放一个负的柱透镜——位移透镜,仅在方位维有光焦度,焦距为 f_s 。它给系统带来的像差很小(可以略去不计),不改变系统的放大率,也不改变斜距像的位置,只是使方位像向后移 S_a 距离^[7]:

$$S_a = -f^2/f_s, \quad (6)$$

这样,普通物体($f_r = f_s = 0$)经过带位移透镜的斜距望远镜所成的像,和二维分开的物体($f_r = 0, f_s = S_a$)经过不带位移透镜的斜距望远镜所成的像,对其后面的方位望远镜来说,两者效果相同。用这种办法可以检测系统的方位分辨率和几何失真,对于斜距也可以去掉位移透镜。

在 OSARP 的倍率分别为(1/4)、(1/12)、(1/20)、(1/30)情况下,四次处理试验胶片 I。下面只给出 $k=12$ 的结果。因为试验胶片 I 不含全息图,所以 OSARP 的调整状态为:偏置反射镜转角 $\theta=0^\circ$,数据片输片机移至 $f_r=0$,柱透镜焦点间距 $d_1=14.58$ mm; $d_2=171.43$ mm,位移透镜焦距 $f_s=-190.38$ mm,方位望远镜移动量 $z_1=86.3$ mm,两输片机转角 $\alpha=0^\circ$,图像片光阑口径 $I_c \times I_r = 0.2 \times 60$ mm²,频谱面光阑口径 $T_c \times T_r = 4 \times 35$

Table 3

EQUATION FOR RANGE		
-3.7971118891E-4+		
999052206136 * X=0		
R. MASTER	RANGE	ERROR
.2504	.2487	-.001082961227
.5008	.5046	.004654366356
.7503	.7484	-.000809159075
1.0007	.9981	-.001271831491
1.2502	1.2479	-.00073535692
1.5002	1.4964	-.00199840846
1.7504	1.7481	-.00026127043
2.0012	1.9986	-.00032356373
2.2497	2.2491	.00191196305
2.5002	2.4973	-.00015061459
2.75	2.7464	-.00061385568
3.0006	2.9968	-.00057633854
3.2496	3.2464	.00025966213
3.5004	3.4977	.00099736883
RMS=1.58711346736E-3		

Table 4

EQUATION FOR AZIMUTH		
K=12*		
7.29208542629E-4+		
1.00105164548* X=0		
A. MASTER	AZIMUTH	ERROR
.3333	.3334	-.000979721981
.6664	.6667	-.001130025091
.9997	1.0024	.00091946147
1.3329	1.3369	.0018690532
1.6663	1.6733	.0045184346
1.9991	2.0004	-.00153155302
2.3322	2.3338	-.00158185613
2.6653	2.6673	-.00153215924
2.9985	3.0023	-.00018256751
3.3316	3.3348	-.00103287062
3.6649	3.6677	-.00178338406
3.9981	4.0025	-.00053379233
4.3314	4.3375	.00081569423
4.6646	4.6724	.00216528595
RMS=1.77495741717E-3		

mm^2 , 数据片光阑口径 $O_o \times O_r = 100 \times 70 \text{ mm}^2$, 用 RAR 3414 做记录胶片。在处理好的图像片上用显微镜测量最小可分辨间距求得系统的分辨率。测量结果为方位鉴别率 = 50 lp/mm; 斜距鉴别率 = 50 lp/mm。

几何失真是指在图像片上规定画幅内实际像点对拟合直线上理想像点位置的均方根偏差(RMS)。本试验是在万能工具显微镜上测量的, 数据用计算机处理, 结果如下: 方位维 $k=12$, 模板线条位置 X_i (A. MASTER), 模板像线条位置 Y_i (AZIMUTH), 拟合直线方程为 $Y(X_i) = 1.001X_i + 7.3 \times 10^{-4}$, 实际像点对拟合直线上理想像点的偏差为 $Y(X_i) - Y_i$ (ERROR), 在图像片上方位维 4.6 mm 范围内 $\text{RMS} = 1.77 \times 10^{-3} \text{ mm}$; 斜距维和方位类似, 在图像片上斜距维 3.5 mm 范围内 $\text{RMS} = 1.59 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。具体数据见表 3、表 4 所示。

四、OSARP 处理各种 SAR 相位历程的能力

通用 OSARP 是根据现有 SAR 参数研制的。我们选几种典型的 SAR 参数用光学方法或电子计算机方法制做出一套模拟 SAR 数据片^[4], 并把它分段复制在胶片上, 叫做试验胶片 II。这里给出其中一种, 参数为: 方位偏置角 $\theta = 30'$, 斜距焦距 $f_r = 50 \text{ mm}$, 方位焦距(远) $f_{\max} = 3495 \text{ mm}$; (中) $f_a = 2961 \text{ mm}$, (近) $f_{\min} = 2427 \text{ mm}$, 数据片孔径长度 $B_o \times B_r = 40 \times 1.5 \text{ mm}^2$, 斜距缩比 $q = 1.5 \times 10^5$, 方位缩比 $p = 1.25 \times 10^4$, 纵横比 $k = 12$, 把试验胶片 II 放在 OSARP 上处理, 对于不同种类的数据片, 应把 OSARP 调整成对应的状态。对于上面所给 SAR 数据片参数 OSARP 的调整状态为: OSARP 倍率 $A_R = 1/12$, 偏置反射镜转角 $\theta = 30'$, 数据片输片机位置 $f_r = 50 \text{ mm}$, 柱透镜间距 $d_1 = 14.58 \text{ mm}$; $d_2 = 171.43 \text{ mm}$, 方位望远镜移动量 $z_1 = 86.62 \text{ mm}$, 两输片机转角 $\alpha = 9^\circ 38'$, 图像片光阑口径 $I_o \times I_r = 0.2 \times 60 \text{ mm}^2$, 频谱面光阑口径 $T_o \times T_r = 4 \times 35 \text{ mm}^2$, 数据片光阑口径 $O_o \times O_r = 100 \times 70 \text{ mm}^2$, 处理出的结果应该是预定目标的图像。我们所给的是地面相距 4 m 远的三个点目标, 它们分别位于通道的远、中、近斜距处, 用光学模拟的数据片如图 3(a) 所示。图 3(b) 为处理后的图像(三个亮点, 每点含三个点目标), 图 3(c) 为图 3(b) 中间小亮点放大 100 倍

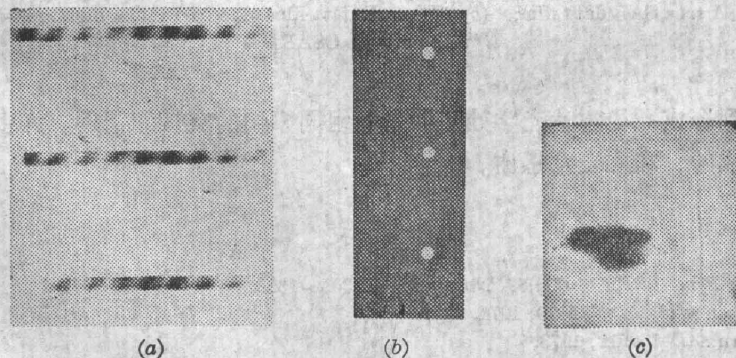


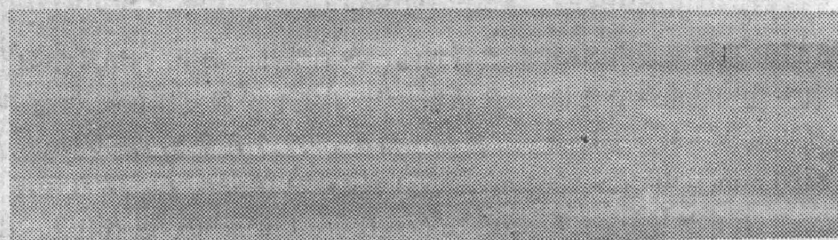
Fig. 3

(a) Simulated SAR data film of three point scatterer; (b) Processed result of the data film;
(c) Magnified local Fig. (b) by 100 time

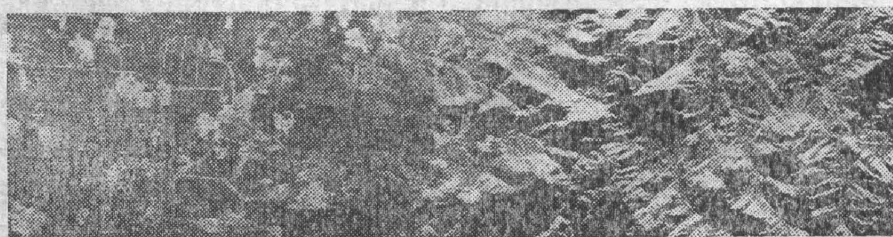
黑白反转的图像。由图可以看出, OSARP 具有处理这种 SAR 相位历程的能力, 即能从这种 SAR 数据片处理出预定目标图像。并且能把相距 4 m 远的地面点目标分辨开。如果得不到预定目标的图像, 说明 OSARP 不具备处理该种 SAR 相位历程的能力, 原因可能是 OSARP 的适用范围不够, 或者是因为 OSARP 的成像质量差。一般的情况下, 这种检测结果与前面检测的结果应该是一致的。

五、SAR 和 OSARP 综合成像质量

把真实 SAR 数据片放在 OSARP 上处理, 方法类似于处理试验胶片 II, 按 SAR 数据片的参数把 OSARP 调整好。采用进口 SAR 给出的数据片试验, 处理结果如图 4 所示。图 4(a) 为真实 SAR 数据片, 图 4(b) 为 OSARP 处理后的图像。处理结果表明, OSARP 能处理这种 SAR 的数据片, 并且表明被检 OSARP 与这种 SAR 配合能得到满意的 SAR 图像。



(a)



(b)

Fig. 4

(a) A true SAR data film; (b) The SAR data film processed into a high-resolution map with the OSARP

本工作得到合成孔径雷达光学处理器研制组同事们的支持和帮助。许多工作是和蒲泽民同志共同完成的。在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] N. E. Leith: *Proc. IEEE*, 1971, **59**, No. 9 (Sep), 1305~1318.
- [2] D. C. Robinson *et al.*; *AD-732870*, 1971.
- [3] R. H. Oeburn; *AD-759512*, 1973.
- [4] 金友, 周玉斌, 蒲泽民; 《物理》, 1981, **10**, No. 7 (Jul), 433~436.
- [5] Wai-Hon Lee *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 4 (Apr), 925~930.
- [6] A. Kozma *et al.*; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 8 (Aug), 1766~1777.
- [7] E. B. Felstead; *AD-4071358*, 1979.

A method of inspection of an optical synthetic aperture radar processor

JIN YOU

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 19 September 1986; revised 17 November 1986)

Abstract

In this paper we take a general OSARP inspection as an example to explain the method of inspection of an OSARP. We relate the adjustable quantities of each adjustable assembly of the OSARP (Optical Synthetic Aperture Radar Processor) with each characteristic number of a SAR (Synthetic Aperture Radar) data film. The applicable range of the OSARP is obtained by testing the adjustable quantities. The imaging quality of the OSARP is inspected with the general testing targets and a shift lens. The advanced inspection of the OSARP is done with the simulated SAR data films. It is a different way, but the results are the same as the former. Finally, the true SAR data film is processed to show the comprehensive imaging quality of the SAR and the OSARP. The experimental pictures and data presented in this paper are for reference only. The experimental results show that the method is applicable.

Key Words: OSARP; SAR; data film.